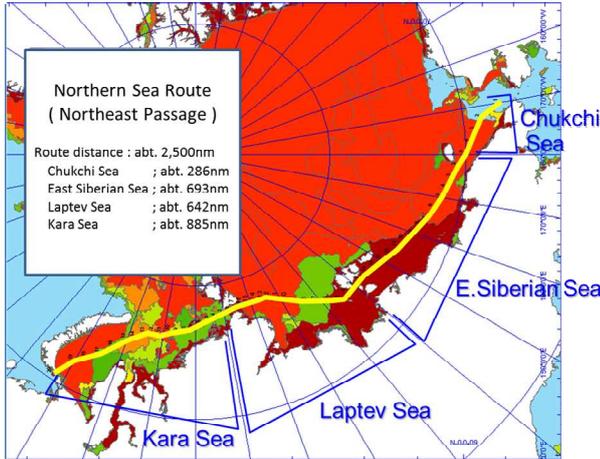


北極海航路利用船の航行性能の評価

Ship Performance for Navigation through Northern Sea Route



技術研究所 氷海研究グループ

山内 豊	YAMAUCHI Yutaka
水野 滋也	MIZUNO Shigeya
安齋 圭祐	ANZAI Keisuke

概要

北極海の夏期海水分布の減少にともない、北極海航路の商用利用は徐々に増えてきた。その航海可能期間や経済性は氷海商船の氷海域航行性能によって異なり、また砕氷船によるサポート体制によっても左右される。氷海商船の船型や搭載主機、航路沿いの氷状の変化、砕氷船エスコートの必要性の有無などを考慮して北極海航路の航海性能（航海日数、燃料消費、エスコート要請期間など）を評価するシミュレーションモデルを開発し、アイスクラス IA Super の氷海商船について航海性能を評価した。

Summary

The amount of merchant ships which navigate through the Northern Sea Route (NSR) is increasing gradually as the sea ice extent of the Arctic Ocean is decreasing in summer season. That navigable term or the economic efficiency on fuel consumption is strongly influenced by the ice class / icebreaking capability of merchant ship, icebreaker's support system, and so on. This paper shows the effect of the performance of IA super class merchant ships in ice-covered waters to the navigation through the NSR (voyage days, fuel oil consumption and icebreaker's support days) from the result of the NSR voyage simulation.

1. 緒言

北極海航路は極東～欧州間の航路短縮あるいはヤマル天然ガスなど北極域資源の海上輸送で注目されてきた。北極海航路を利用する商船には、安全な航海を行うための船級のアイスクラス規則、ポーラーコード、NSR 航行規則など通常海域を航行する船舶とは異なった規則が適用され、耐氷構造、推進系、機器の低温対策、環境対策などに関する要求を満足するように設計される。一方、北極海航路の航海性能はアイスクラスに必ずしも対応するものではなく、通行可能な期間や燃料消費など運航コストで南周り航路に対して優位

となる期間は、砕氷船のエスコート体制や、自船の砕氷能力の有無によって大きく異なる。

本稿では、北極海航路を利用する商船に必要なアイスクラスや氷海航行性能について考察するとともに、ロシア沿海を通る北極海航路（北東航路）を対象にして、船型や搭載主機の出力を変化させた場合の航海性能（航海日数、燃料消費、被エスコート日数など）への影響をシミュレーションによって調査した。

2. 北極海航路を利用する氷海商船

2.1 北東航路と北西航路

北極海航路は図 1 に示すように、ロシア沿海を航

行する北東航路（Northeast Passage）とカナダ沿海を航行する北西航路（Northwest Passage）に分けられる。一般にNSR（Northern Sea Route）と言えば北東航路のことを表す。

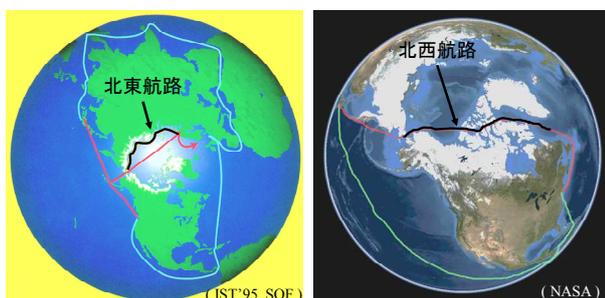


図1 北東航路と北西航路

Fig.1 Northeast Passage and Northwest Passage

2.2 北東航路利用船

北東航路を利用する商船には NSR 航行規則が適用され、アイスクラスは基本としてロシア船級 Arc4 以上（Finnish-Swedish Ice Class IA 以上）が推奨されている。これらは主に耐氷船であり、氷状の厳しい海域ではロシアの砕氷船がエスコートする¹⁾。Arc4 の商船の場合、北東航路の航行可能な最長期間はおよそ 6 月～11 月となっている。ロシア船級規則では、砕氷船のエスコートを受けても北東航路を通年航行できる船舶のアイスクラスは Arc5 以上（Finnish-Swedish Ice Class IA Super 以上）としている²⁾。

一方、ヤマル半島の LNG 積出しやペチョラ海のバラディターミナルの原油積出しなど、北極域資源の積出しで北東航路を部分利用する船舶としては、より安定した航海を行うために氷厚 1.5m 以上の砕氷能力をもった砕氷商船³⁾が導入され、単独航海も可能としている。砕氷船によるエスコートの義務付けはなくなったが、航路上の海氷がほとんどなくなる夏期の一時期を除いては、実質的にはエスコート無しの航海は大きなリスクをとらなう。

2.3 北西航路利用船

北西航路のトランジット航海では、北東航路以上に氷状の厳しい海域や水深データが整っていない海域も多く、また海水が消失する期間も短い。耐氷クラス IA 相当の耐氷商船もトランジット航海を行った例はあるが、北東航路における強力なロシア砕氷船団のようなエスコート体制もカナダ側は不十分である。単独航海を基本として砕氷商船が使用されることが多いと考えられる。カナダでは 16 に分けた海域毎にアイスクラス（耐氷または砕氷クラス）に対して航行可能期間を定めた Zone / Date system や、氷状とアイスク

ラスによって計算される指標（Ice Numeral）で航行の可否を判定する AIRSS（Arctic Ice Regime Shipping System）を導入しており、これらに従った安全な航海を義務付けている⁴⁾。

3. NSR 航行シミュレーション

3.1 シミュレーションの手法

3.1.1 シミュレーションの全体像

北東航路を対象に商用航路としての可能性を評価するためのシミュレーション⁵⁾はこれまでに数多く行われてきたが、その航海に適切なアイスクラスあるいは砕氷性能について評価された例は少ない。NSR 航行シミュレーションモデルを開発し、船型や搭載主機が航海日数や燃料消費量に及ぼす影響を調査した。シミュレーションの全体の流れを図 2 に示す。

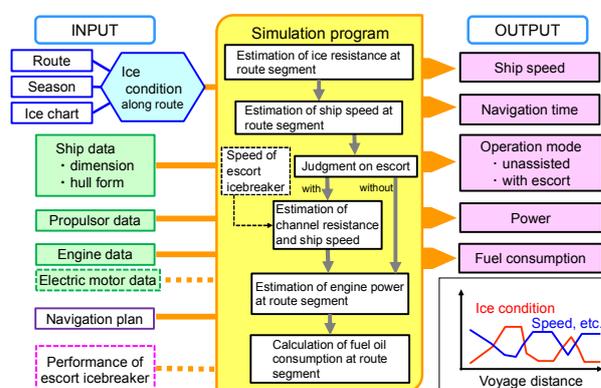


図2 NSR 航行シミュレーションの概略フロー

Fig.2 Simulation flow on NSR navigation

3.1.2 航路と氷状

Chukchi 海～Kara 海までの北東航路約 2,500 海里を対象とした（page 1 航路図）。航路を 5～10 海里のセグメントで分割し、極東から欧州へ順次セグメント単位で船速、主機出力などを推定しながら対象船を進めていく手法とした⁶⁾。

近年は衛星データの分析技術の進歩に伴って分解能の高い氷状データが取得できるようになったが、ここでは WMO（World Meteorological Organization）の Egg code に対応した 2009 年～2010 年の海水データ（SIGRID）を参照して、航路沿いの海水密度、氷厚を確率的に生成した。積雪は氷厚の 15% を仮定した。それぞれの航路セグメントにおいては氷状は一定と見なしている。評価対象月は、夏期を中心に 6 月～1 月の期間とした。一例として図 3 に 10 月の航路沿いの氷状を示した。

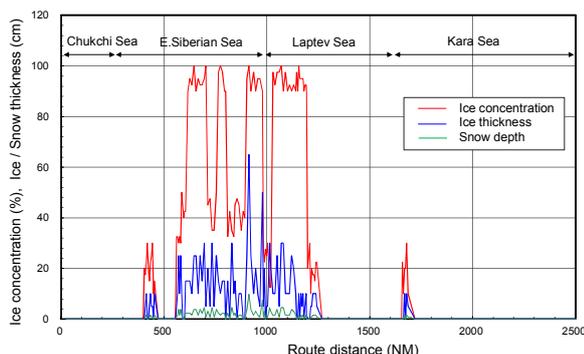


図3 NSR 沿いの氷状生成例 (10月)

Fig.3 Ice conditions along ship route (October)

3.1.3 船速推定

それぞれのセグメントの氷状に対して、抵抗、推進器特性、主機運転条件からスラスト一致法で平均船速を推定している。単独航行時の砕氷抵抗は氷海水槽試験によって検証された、船体3次元パネルによる数値計算などによって推定されるが、本ケーススタディにおいては *Ionob* の簡易計算手法を用い、式(1)の抵抗成分を考慮した。本手法では、航行時喫水における水面近傍の船体形状と海水の物性値から抵抗を推定する。砕氷船のエスコートを受ける航行時は、砕氷船に追従する商船は砕氷船によって開かれたチャンネル内の氷塊を砕氷することはないと仮定し、式(1)の R1 以外の抵抗成分をチャンネル内の氷塊分布を仮定して計算した (図 4)。また海氷の存在しないセグメントでは、計画航海速度で航行すると仮定した。

$$R_t = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 \quad (1)$$

R_t : 全抵抗,

R_1 : 船首部の砕氷抵抗,

R_2 : 船首部の氷片の回転・沈降にともなう抵抗,

R_3 : 船首部の氷片の押し分けにともなう抵抗,

R_4 : 平行部を流れる氷片の摩擦による抵抗

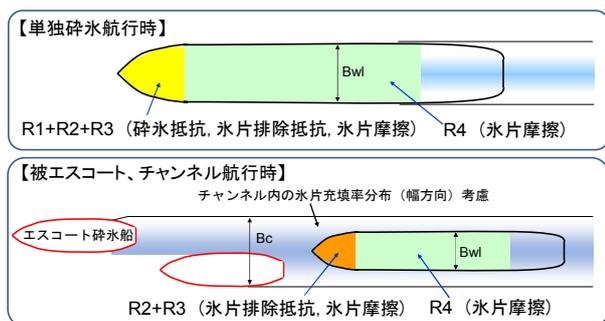


図4 単独航行とエスコート航行の抵抗成分

Fig.4 Ice resistance components at navigation with/without icebreaker's support

3.1.4 エスコート航行の判定

単独航行時の船速が 3 ノット以下になるようなセグメントでは、砕氷船のエスコートを受けると仮定した。ただし、エスコート航行と判定されたセグメントに挟まれた単独航行可能な海域が 20 海里に満たない場合も、砕氷船に追従するとした。

エスコート砕氷船としては、3 ノット連続砕氷可能氷厚 2.2m、推進出力 47.5MW、船幅 30m の砕氷船を想定し、氷状が厳しい場合にはラミング航行を行うことも考慮した。

3.2 シミュレーションの対象船

北東航路トランジット航海を行っている商船のアイスクラスは Arc4 (IA) が大多数であり、基本として砕氷船のエスコートを受ける。しかしながら現状サポートできる砕氷船は 4 隻程度と少なく、砕氷船の後に複数隻の耐氷商船が列をなして追従するコンボイ方式の船隊で運航されることが多い。ここでは氷厚 1m 以下の砕氷機能も有する IA Super 相当パナマックスサイズの TYPE-1、TYPE-2 の氷海商船を想定した。船首形状と主機出力の違いにより、それぞれの砕氷可能な氷厚は 1m 及び 0.7m としている。推進器は一軸可変ピッチノズルプロペラを想定し、砕氷航行時の推進効率は類似船の氷海水槽試験の結果を参考とした。通常海域における 14 ノット航海速度時の推進出力は、TYPE-1 が 9,280kW、TYPE-2 が 8,680kW である。図 5 に TYPE-1、TYPE-2 の氷海商船の船首形状の特徴を、表 1 に主な要目を示す。

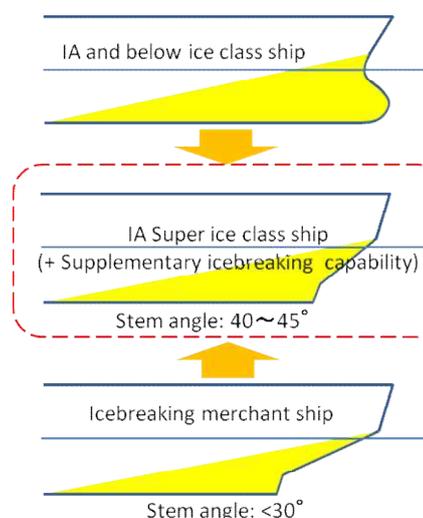


図5 氷海商船の代表的な船首形状

Fig.5 Typical bow form for ice class or icebreaking merchant ship

表1 シミュレーションの対象船主要寸法

Table 1 Main particulars of ice class ships for this study

	TYPE-1	TYPE-2
Length ; Loa (m)	approx. 225.0	
Length ; Lpp (m)	217.00	
Breadth (m)	32.26	
Depth (m)	approx. 19.5	
Design draft (m)	12.50	
Stem angle (deg.)	40	45
Icebreaking capability (level ice thickness at 3kt)	1.0	0.7
Maximum continuous engine output (MW)	17.5	10.5
Service speed (knot)	14.0	

3.3 砕氷性能によるNSR 航海状況の違い

月別の片道1航海の航海日数を図6に、エスコート必要時間を図7に、燃料消費量を図8に、それぞれTYPE-1とTYPE-2を比較して示した。

このシミュレーションの対象月では、航海日数は12月、1月の氷状の厳しい時期を除いて、TYPE-1とTYPE-2の間に大きな差は見られない。12月、1月の差は、主にChukchi海及びKara海における単独氷海航行時の船速の差による。

単独では航行することができず砕氷船のエスコートを受ける必要のある時間にはTYPE-1とTYPE-2で明らかな差が現れ、TYPE-2のエスコート必要時間はTYPE-1の約1.5倍となる。

1航海の燃料消費量は、出力及び船速を上げて単独氷海航行を行う区間が多いTYPE-1の方が大きくなり、TYPE-2の10~20%増となる。このシミュレーションの例では運航採算を直接評価することを目的としないが、燃料消費の増分を相殺するほどにエスコートを受けるための砕氷船費用の影響が大きい場合には、TYPE-1は氷状の厳しい時期において運転コストで有利となる可能性がある。

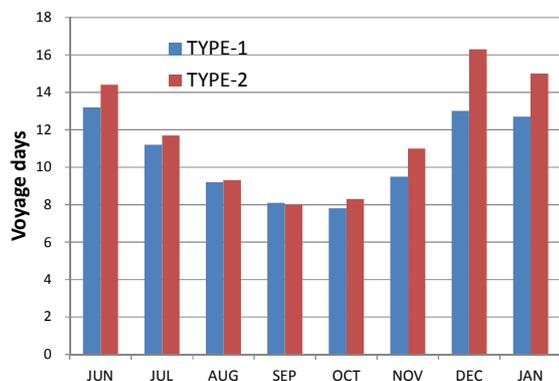


図6 航海日数の比較

Fig.6 Voyage days for NSR navigation

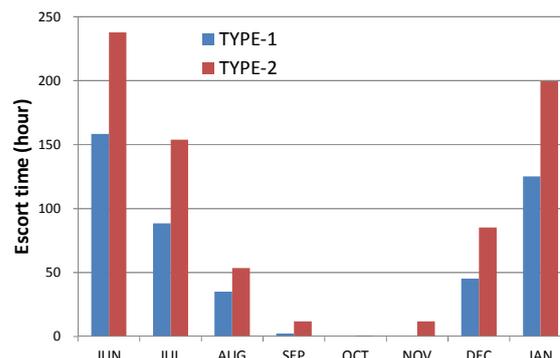


図7 エスコート必要時間の比較

Fig.7 Time of voyage with icebreaker's escort

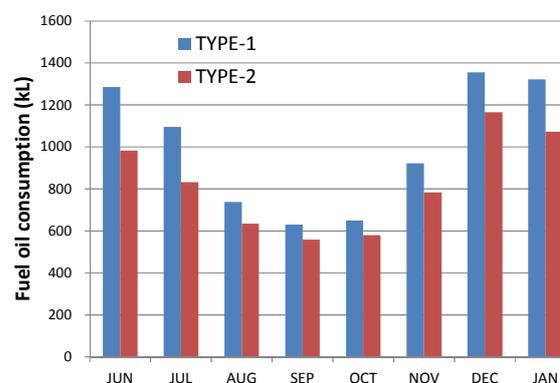


図8 燃料消費量の比較

Fig.8 Fuel oil consumption for NSR navigation

一方、夏期9月~11月の両者ともにエスコート率の小さな月では高い砕氷性能を有するTYPE-1の利点はほとんどなくなると考えられる。

3.4 スエズ運河周り商船との航海性能比較

3.3のシミュレーション結果を基に、横浜~ハンブルグ間の航海において、TYPE-1、TYPE-2の氷海商船がNSRを利用する場合と、アイスクラスではない同じサイズの通常商船がスエズ運河を経由して航海する場合の航海性能を比較した。評価条件は以下に示すとおりで、NSR経由航海のアイスクラス船ではNSR以外の通常海域での船速を14ノットとした場合(Case1)と、航海日数の短縮を活かして10ノットの減速運転を行なう場合(Case2)の2ケースを想定している。

a)アイスクラス商船によるNSR経由航海

- 対象船：3.2で想定したTYPE-1及びTYPE-2
- NSR以外の速力：14ノット(Case1), 10ノット(Case2)
- 燃料消費率：175g/kWh (14ノット常用出力時)
- 航程：7,250海里 (内NSR 2,505海里)

b) 通常商船によるスエズ運河経由南周り航海

- ・対象船：TYPE-1, TYPE-2 と同じ寸法のアイスクラスでない通常商船
- ・航海速力：常用出力 8,000kW において 14 ノット
- ・燃料消費率：165g/kWh (14 ノット常用出力時)
- ・航程：11,600 海里

図 9 と図 10 に、Case1 の運航による NSR 利用氷海商船の航海日数と燃料消費量をそれぞれスエズ運河経由通常船と比較して示した。また図 11 と図 12 に、Case2 の通常海域減速運転の場合の NSR 利用氷海商船の航海日数と燃料消費量をそれぞれスエズ運河経由通常船と比較して示した。

Case1 では 6 月～1 月の評価月において、航海日数は TYPE-1、TYPE-2 ともにスエズ運河経由通常船の航海日数の 65～80% に短縮される。燃料消費量は TYPE-2 で夏期の 3 ヶ月程度はスエズ運河経由の通常船よりも小さくなるが、それ以外では劣る。今回の解析では、アイスクラス船の航海速力での主機燃費率を通常船に対して大きく設定しているが、これを同等としても燃料消費で優位となるのは、TYPE-1 で 2 ヶ月、TYPE-2 で 4 ヶ月程度と評価した。

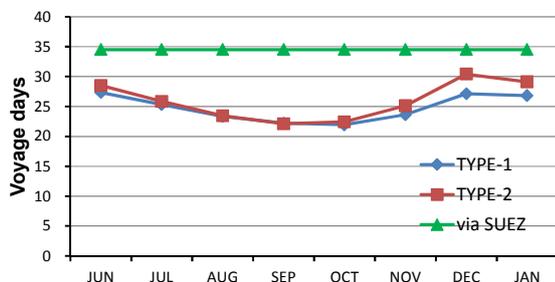


図 9 横浜～ハンブルグ間の航海日数 (Case1)

Fig.9 Voyage days from Yokohama to Hamburg (Case1)

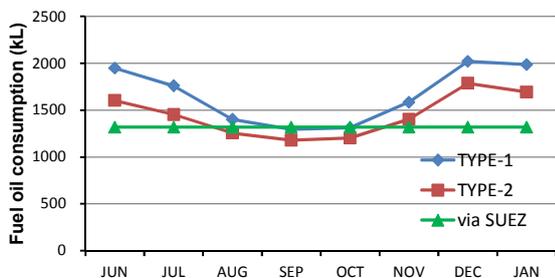


図 10 横浜～ハンブルグ間の燃料消費 (Case1)

Fig.10 FOC from Yokohama to Hamburg (Case1)

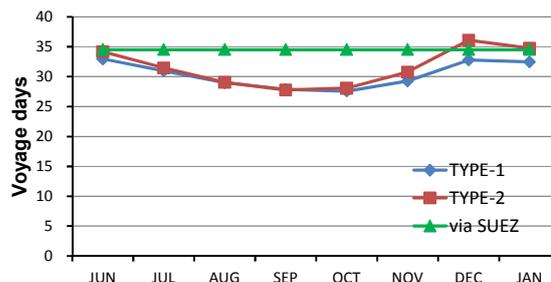


図 11 横浜～ハンブルグ間の航海日数 (Case2)

Fig.11 Voyage days from Yokohama to Hamburg (Case2)

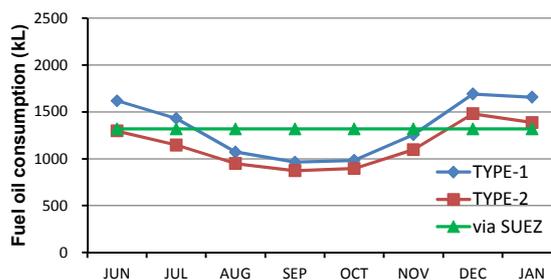


図 12 横浜～ハンブルグ間の燃料消費 (Case2)

Fig.12 FOC from Yokohama to Hamburg (Case2)

NSR 利用船が通常海域で 10 ノットの減速運転を行なうと想定した Case2 では、TYPE-1 で夏期の約 3.5 ヶ月の期間は航海日数、燃料消費ともにスエズ運河経由の通常船よりも優位になると推定した。また TYPE-2 では 6 月～11 月の約半年の期間は航海日数、燃料消費ともに優位になると推定した。

以上のスエズ運河経由通常船との航海性能の比較評価においては、砕氷性能を 0.7m 程度に抑えた TYPE-2 の方が優位期間を延長できる可能性がある。これらは航海日数と燃料消費量に的を絞った性能上の評価例を示したものであるが、経済性も含めた総合的な評価としては、NSR 通行料・エスコート費用とスエズ運河通行料の大小関係も考慮する必要があり、さらには TYPE-1 や TYPE-2 と通常船との資本費や保険費の違いも考慮しなければならない。

4. 結言

北極海航路を航行する船舶の適切な仕様を考える一つの検討材料として、アイスクラス商船の北極海航路航海性能に関するケーススタディの一例を示した。

北極海航路についてはその利用促進に向けた航行規則の改正も進められつつあるが、北極海航路を利用する商船がどこまでの氷海域航行性能を備えるかは、エスコート砕氷船など支援体制やインフラ整備にも密接に関係する。

今回のケーススタディでは、これらの不確実な条件は考慮していないが、アイスクラス商船の具体的な仕様を可能な限り織り込んで商船の氷海域航行性能（航海日数、エスコート必要時間、燃料消費）に絞った調査を行った。このような具体的な船の仕様を考慮した分析を積み重ねていくことは、今後の周辺条件の動向に対応した商船の建造計画や、北極海航路のメリットを活かせる運航計画を検討するためにますます重要になると考える。

参考文献

- 1) Ruksha, V. : Atomic icebreaking fleet and development of the northern sea route, International seminar on sustainable use of the northern sea route in Tokyo, pp. 3-1~3-14, (2014)
- 2) Russian maritime register of shipping : Rules for the classification and construction of sea-going ships, pp. 21-23, (2008)
- 3) 山内 豊 : 氷海航行可能な商船の紹介、日本船舶海洋工学学会 KANRIN 23 号、pp. 29-32、(2009)
- 4) Nazha, N. : Training and Certificate ~The Canadian approach~, International seminar on navigational safety in polar waters, (2015)
- 5) シップ・アンド・オーシャン財団 : 北極海航路～東アジアとヨーロッパを結ぶ最短の道～、pp. 91-111、(2000)
- 6) 山内 豊, 水野滋也 : 北極海航路を利用する船舶の性能と課題、第 25 回海洋工学シンポジウム講演論文集、OES25-062、(2015)
- 7) Ionob, B.P. : 船舶の氷抵抗とその要素 (原文ロシア語)、pp. 34-44、(1988)



山内 豊



水野 滋也



安齋 圭祐